

ТРАНСПОРТ

УДК 629.1.04:621.36

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.5.1/36>

Кириченко О.С.

Національний транспортний університет

Клочков Ю.П.

Національний транспортний університет

Мельник В.Ю.

Національний транспортний університет

Коломієць Д.П.

Національний транспортний університет

Вечурко О.М.

Національний транспортний університет

Шевченко В.І.

Національний транспортний університет

МОДЕЛЮВАННЯ РОБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОГО МОДУЛЯ ДЛЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ ГІРОСКОПІВ СУДНОВОЇ НАВІГАЦІЇ

Сучасні суднові навігаційні системи потребують надійних приладів визначення курсу. У зв'язку з цим гірокомпаси часто оснащують волоконно-оптичними гіроскопами. Даний тип гіроскопів відносять до високоточних оптико-електронних приладів, які здатні забезпечити визначення курсу судна незалежно від сигналів GPS та інших навігаційних приладів. Волоконно-оптичні гіроскопи часто оснащені термоелектричними модулями Пельтьє для охолодження суперлюмінесцентних діодів (SLD), що формують інтерференційний сигнал в оптоволокні джерел оптичного випромінювання. Експлуатація в реальних судових умовах потребує наявності додаткового ізоляційного захисту термоелектричних компонентів від підвищеної вологості, соляного туману та вібрацій. У даній роботі було розроблено мініатюрний термоелектричний модуль з модифікованим епоксидним компаундом. На основі створених креслень було створено просторову модель модуля, яку було досліджено чисельним методом розрахунку. Результати розрахунку термоелектричного модуля волоконно-оптичного гіроскопа при амперажі від 0 до 2 А було використано для побудови його характеристик у вигляді графіків функціональних залежностей основних величин, а також плоских і тривимірних поверхонь співвідношення величин. Аналіз результатів дозволив оцінити ефективність використання розробленого мініатюрного термоелектричного модуля у волоконно-оптичних гіроскопах судових навігаційних систем.

У виконаному дослідженні проведено аналіз ТЕМ з геометричними розмірами $8 \times 8 \times 3$ мм, згідно цим розмірам його можна віднести до класу мініатюрних термоелектричних модулів. Термоелектричний ланцюг ТЕМ було сформовано на базі 21-ї P-N-термопари, що налічувала II напівпровідників P- і II напівпровідників N-типу. Розмір напівпровідників складав $0,82 \times 0,82 \times 1,5$ мм. В якості матеріалу обох типів напівпровідників було використано телурид вісмуту Bi_2Te_3 з коефіцієнтами Зеебека $\alpha_p = +1,8 \cdot 10^{-4}$ В/К і $\alpha_n = -1,8 \cdot 10^{-4}$ В/К, для контактних комутаційних пластин – мідь, а для корпусу – кераміку Al_2O_3 . Всередині модуль було заповнено модифікованим епоксидним компаундом з модулем

© Кириченко О.С., Клочков Ю.П., Мельник В.Ю., Коломієць Д.П., Вечурко О.М., Шевченко В.І., 2025

Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

Юнга $E=10$ ГПа, коефіцієнтом Пуассона $\nu=0,2$, коефіцієнтом теплопровідності $k=1,0$ Вт/(м·К), коефіцієнтом теплового розширення $\alpha_m=1,2 \cdot 10^{-5}$ К⁻¹. Моделювання ТЕМ з використанням чисельного методу проводилось з урахуванням електричних, теплових і механічних процесів. Встановлено, що при робочому струмі ТЕМ 0,6-0,75 А наявний температурний перепад між сторонами модуля – 20-27 °С. В дослідженні, також, розглянуто можливості для проведення подальшої оптимізації матеріалів ТЕМ і його конструктивних особливостей для розробки нових поколінь мініатюрних охолоджувальних модулів для волоконно-оптичних гіроскопів систем суднової навігації.

Ключові слова: моделювання, термоелектричний модуль, робочі характеристики, волоконно-оптичні гіроскопи, суднова навігація.

Постановка проблеми. Волоконно-оптичні гіроскопи (FOG) характеризуються високою точністю, надійністю та відсутністю рухомих частин і є складовою частиною гірокомпасів [1, 2], які широко застосовуються у суднових навігаційних системах. Їх ефективність значною мірою залежить від стабільності температурного режиму, зокрема роботи суперсвітлолюмінесцентних діодів (SLD) – основних джерел оптичного випромінювання, необхідного для формування інтерференційного сигналу. Термоелектричні модулі (ТЕМ) забезпечують теплову стабільність SLD [3-6], однак їхні характеристики змінюються під впливом реальних суднових умов експлуатації, таких як, підвищена вологість, соляний туман, вібрації [7, 8]. Тому актуальним є створення просторової моделі термоелектричного модуля з модифікованим компаундом для подальшого аналізу чисельним методом [9] його робочих характеристик в умовах, наближених до експлуатаційних.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Волоконно-оптичні гіроскопи займають одне з основних місць у складі суднових гірокомпасів завдяки високій точності та відсутності рухомих частин, що ґрунтовно висвітлено у працях із теорії та практики FOG [1-4]. Критичною умовою стабільності є температурне керування джерелами випромінювання: для SLD широко застосовують термоелектричні модулі Пельтьє та відповідні алгоритми контролю [5, 6]. Розвиток апаратних засобів керування температурою інерціальних і MEMS-вузлів демонструє ефективність компактних ТЕС-контролерів і схем тепловідведення [10-12]. Матеріалознавчу та методичну основу формують роботи з термоелектрики й параметризації матеріалів і з'єднань, а також узагальнення щодо термоелектричного охолодження оптоелектронних компонентів [13-16]. Для мініатюрних ТЕМ у транспортній та морській тематиці описано геометричні рішення [17, 18], варіанти контактних з'єднань і конвективні підходи до тепловідведення [19, 20], демпфування термонапружень і чисельне 3D-моделювання [21-24], а для маш-

табних енергетичних систем розглянуто оцінку термоелектричних генераторів в установках ОТЕС [25]. Узагальнено, що важливою задачею є інтеграція високостабільних оптичних джерел із мініатюрними ТЕМ, що зберігають надійність у морському середовищі (вологість, соляний туман, вібрації) і не погіршують масо-габаритних показників навігаційних систем [3, 5, 6, 17, 18].

Метою статті є моделювання робочих характеристик термоелектричного модуля з модифікованим епоксидним компаундом для оцінки його ефективності у забезпеченні температурної стабільності суперлюмінесцентних діодів у волоконно-оптичних гіроскопах суднової навігації.

Виклад основного матеріалу. Для опису волоконно-оптичного гіроскопа як частини системи навігації та управління курсом судна, можна розглянути кілька основних рівнянь. Волоконно-оптичний гіроскоп вимірює кутову швидкість на основі ефекту Саньяка, а потім ці дані інтегруються для визначення курсу судна [1-3]. Нижче наведено декілька основних рівнянь для моделювання поведінки волоконно-оптичного гіроскопа у навігаційній системі.

Основне рівняння для волоконно-оптичного навігаційного гіроскопа базується на ефекті Саньяка:

$$\Delta\varphi = \frac{8\pi A\Omega}{\lambda c}, \quad (1)$$

де $\Delta\varphi$ – зсув фази між двома протилежними світловими хвилями, рад;

A – площа, охоплена оптичним волокном, м²;

Ω – кутова швидкість обертання судна, рад/с;

C – довжина хвилі світла, м;

c – швидкість світла у вакуумі ($\sim 3 \cdot 10^8$ м/с).

Обробка сигналу з волоконно-оптичного гіроскопа забезпечує визначення кутової швидкості, яка використовується для оцінки зміни курсу судна:

$$\Omega = \frac{\Delta\varphi \cdot \lambda \hbar}{8\pi A}. \quad (2)$$

Це дає змогу отримати миттєву кутову швидкість, яка інтегрується для визначення кута повороту (курсу):

$$\psi(t) = \int_0^t \Omega(\tau) d\tau, \quad (3)$$

де $\psi(t)$ – курс судна в момент часу t , рад;
 $\Omega(\tau)$ – кутова швидкість, рад/с;
 t – час, с.

Якщо волоконно-оптичний гіроскоп входить до складу системи автоматичного керування курсом, можна описати систему керування в якості наступної моделі управління курсом судна:

$$T \frac{d\Omega}{dt} + \Omega = K \cdot u(t), \quad (4)$$

де T – стала часу судна (інерційність), с;

K – коефіцієнт підсилення, рад/с / од. керуючого сигналу;

$u(t)$ – вхідний сигнал (наприклад, з автопілота чи рульового механізму), рад/с або умовні одиниці, залежить від реалізації.

Якщо використовується зворотний зв'язок на основі вимірювань волоконно-оптичного гіроскопа, то вираз для вхідного сигналу буде наступний (ПД-регулятор):

$$u(t) = -k_p (\psi(t) - \psi_{\text{зад}}(t)) - k_d \Omega(t) \quad (5)$$

де $u(t)$ – керуючий сигнал, од. керування;

$\psi(t)$ – поточний курс, рад;

$\psi_{\text{зад}}(t)$ – бажаний курс, рад;

k_p – коефіцієнти пропорційного регулятора, од./рад;

k_d – коефіцієнти диференціального регулятора, од.·с/рад.

У виразі (5) використано негативні знаки, тому що регулятор із від'ємним зворотним зв'язком, який зменшує відхилення курсу: різниця $(\psi(t) - \psi_{\text{зад}}(t))$ – це помилка курсу; якщо поточний курс більше за бажаний, регулятор подає команду на зменшення повороту (протидію); згладжує зміну курсу: доданок $k_d \Omega(t)$ вводить демпфування, тобто зменшує амплітуду осциляцій за

рахунок пропорційного врахування швидкості обертання. Рівняння (1)-(5) описують як вимірювання орієнтації судна, так і управління курсом на основі сигналів волоконно-оптичного гіроскопа.

Модуль керування джерелами світла волоконно-оптичного гіроскопа (рис. 1), використаний у роботі [3], забезпечує стабільну роботу двох суперлюмінесцентних діодів (SLD) різної потужності, які працюють на різних довжинах хвиль. Блок автоматичного керування струмом (АКС) подає однаковий струм на обидва діоди, з'єднані послідовно, що зменшує флуктуації потужності та пов'язані шумові спотворення; це реалізується завдяки зворотному зв'язку, який регулює струм на основі вимірюваного падіння напруги на єдиному контрольному елементі в колі живлення. Через різницю в оптичній потужності джерел, змінний оптичний атенуатор встановлюється на діод із вищою потужністю для балансування інтенсивностей випромінювання, що забезпечує симетрію сигналів і покращує точність вимірювань. Кожен SLD має окремий блок автоматичного керування температурою (АТС), який містить термоелектричний модуль Пельтьє та терморезистор з від'ємним температурним коефіцієнтом опору (ТКС); останній забезпечує зворотний зв'язок для точного підтримання температури. Такий контроль є критично важливим для стабільності спектральних характеристик джерел і зменшення температурних дрейфів навігаційних волоконно-оптичних гіроскопів [4-6, 11]. Оптичні сигнали з обох джерел об'єднуються за допомогою мультиплексора для подальшої інтерферометричної обробки.

Для ефективного охолодження суперлюмінесцентних діодів (SLD) у волоконно-оптичних

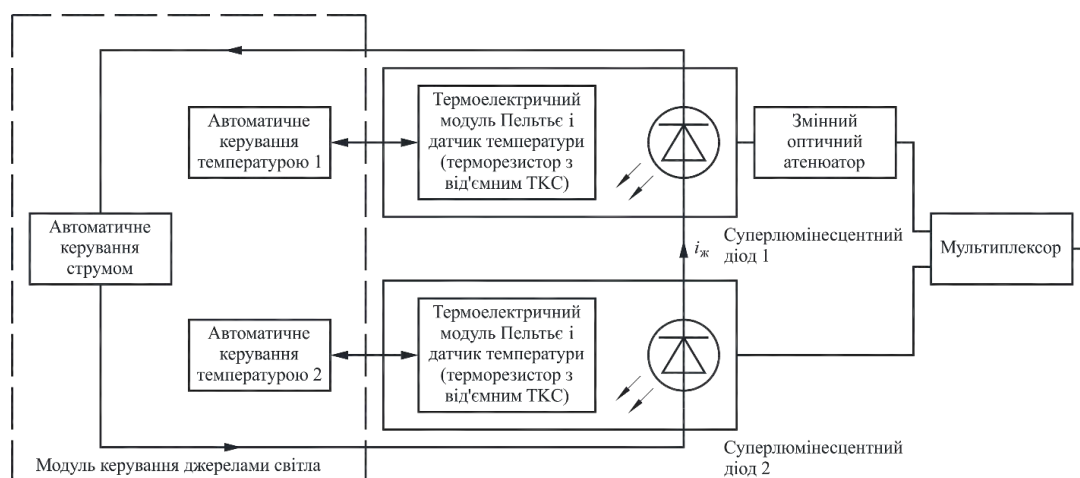


Рис. 1. Схема модуля керування джерелами світла з термоелектричними модулями Пельтьє для диференційного волоконно-оптичного навігаційного гіроскопа

навігаційних гіроскопах застосовуються мініатюрні термоелектричні модулі Пельтьє. Один із таких модулів має розміри $8 \times 8 \times 3$ мм і містить 22 напівпровідникові елементи (11 P - і 11 N -типів), з'єднані у 21 термопару через 23 мідні контактні пластини [19, 26]. Елементи розташовані симетрично у корпусі 8×8 мм у конфігурації 4×6 , з міжелементними відстанями 0,44 мм по горизонталі та 0,94 мм по вертикалі. Розмір кожного елемента становить $0,82 \times 0,82 \times 1,5$ мм (об'єм 1 мм^3), що забезпечує компактність конструкції. Контактні пластини товщиною 0,2 мм мають ширину 0,82 мм і довжину 2,58 мм (поздовжні) та 2,08 мм (поперечні), із виступами висотою 0,1 мм для надійного електричного контакту. Напівпровідники виготовлені з телуриду вісмуту Bi_2Te_3 , корпус – з кераміки Al_2O_3 , а заповнення – з модифікованого епоксидного компаунду, що відрізняється від згаданого в джерелах [19, 26] і має інші фізичні характеристики. Також змінені термоелектричні коефіцієнти Зеебека для матеріалів P - та N -типів. П-подібна структура модуля ($6,11 \times 7,12 \times 1,9$ мм) сприяє рівномірному розподілу тепла, ефективному тепловідведенню та мінімізації втрат.

Для аналізу процесу охолодження суперлюмінесцентних діодів (SLD) за допомогою термоелектричних модулів розглянуто електричні та теплові рівняння [6, 13, 16, 27], що враховують опір напівпровідників і контактів, описують баланс між холодною і гарячою сторонами модуля. Електричне рівняння для напруги U на термоелектричному модулі можна записати в наступному вигляді:

$$U = \alpha(T_h - T_c) + IR, \quad (6)$$

T_h – ефективний коефіцієнт Зеебека, В/К;

T_h – температура гарячої сторони, К;

T_c – температура холодної сторони (фіксовано $293,15 \text{ К} \approx 20^\circ\text{C}$), К;

I – електричний струм, А;

R – електричний опір модуля, Ом.

Тепловий баланс холодної сторони, що описує кількість тепла, яке відводиться від охолоджуваного об'єкта:

$$\dot{Q}_c = \alpha IT_c - \frac{1}{2} I^2 R - K(T_h - T_c), \quad (7)$$

$\dot{Q}_c$ – відведене тепло з холодної сторони, Вт;

K – теплопровідність модуля між сторонами, Вт/К.

Тепловий баланс гарячої сторони, що визначає теплове навантаження, яке необхідно відвести від гарячої поверхні:

$$\dot{Q}_h = \alpha IT_h + \frac{1}{2} I^2 R - K(T_h - T_c), \quad (8)$$

$\dot{Q}_h$ – тепловий потік на гарячій стороні, Вт.

Конвективне відведення тепла можна записати як вираз моделі тепловідведення за рахунок конвекції в навколишнє середовище:

$$\dot{Q}_{\text{conv}} = hA_h(T_h - T_\infty), \quad (9)$$

$\dot{Q}_{\text{conv}}$ – тепло, відведене конвекцією, Вт;

h – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/м²·К;

A_h – площа гарячої керамічної пластини, м²;

T_∞ – температура навколишнього середовища ($293,15 \text{ К}$), К.

Рівняння для тепловідведення тепловим випромінюванням:

$$\dot{Q}_{\text{rad}} = \varepsilon \sigma A_h(T_h^4 - T_\infty^4), \quad (10)$$

$\dot{Q}_{\text{rad}}$ – тепло, відведене конвекцією, Вт;

ε – ступінь чорноти поверхні;

$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ – стала Стефана-Больцмана, Вт/(м²К⁴).

Баланс гарячої сторони як умова теплової рівноваги гарячої поверхні при стаціонарному режимі:

$$\dot{Q}_h = \dot{Q}_{\text{conv}} + \dot{Q}_{\text{rad}}, \quad (11)$$

Узагальнене рівняння гарячої поверхні представляє собою нелінійне рівняння для визначення температури гарячої сторони T_h при відомих струмі I та умовах навколишнього середовища:

$$\alpha IT_h + \frac{1}{2} I^2 R - K(T_h - T_c) = hA_h(T_h - T_\infty) + \varepsilon \sigma A_h(T_h^4 - T_\infty^4). \quad (12)$$

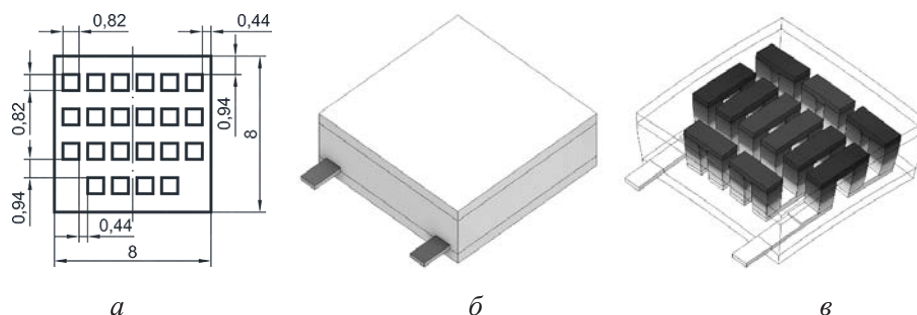


Рис. 2. Термоелектричний модуль Пельтьє волоконно-оптичного навігаційного гіроскопа: а – геометрія; б – пристрій у зібраному вигляді; в – П-подібний термоелектричний ланцюг

Рівняння (6)-(12) є базовою моделлю термоелектричного охолоджувача суперсвітлодіодного діода SLD, з яких можна виводити робочі характеристики (напруга, тепловідведення, коефіцієнт продуктивності охолодження COP).

Враховуючи результати попередніх досліджень, присвячених підвищенню надійності термоелектричних модулів охолодження [28, 29] та температурній стабілізації в оптичних гіроскопах [30, 31], у даній роботі було досліджено температурний розподіл і теплові потоки в термоелектричному модулі для охолодження SLD за умов ідеального тепловідведення з холодної сторони (ізотерма 20 °C). Під час моделювання методом скінченних елементів прийнято наступні допущення: на торцевій поверхні останньої контактної пластини ланцюга встановлювався електричний потенціал $\phi_0=0$ В, температура холодних пластин приймалася $t_0=20$ °C, торці першої та останньої пластини вважалися жорстко закріпленими,

а всі матеріали моделі – ізотропними. Теплообмін із навколишнім середовищем відбувався примусовою конвекцією та тепловим випромінюванням з гарячої керамічної пластини корпусу за таких параметрів: коефіцієнт тепловіддачі $h=50$ Вт/(м²·K), температура оточуючого середовища $t_{oc}=20$ °C, коефіцієнт емісії $\varepsilon_{тв}=0,9$. Властивості матеріалів задавалися окремо для кожного компонента конструкції. Для напівпровідників на основі телуриду вісмуту (Bi_2Te_3) приймалися коефіцієнти Зеебека $\alpha_p=+1,8 \cdot 10^{-4}$ В/К та $\alpha_n=-1,8 \cdot 10^{-4}$ В/К, питомий опір $\rho=1,0 \cdot 10^{-5}$ Ом·м, теплопровідність $k=1,5$ Вт/(м·K), модуль пружності $E=4,5 \cdot 10^{10}$ Па, коефіцієнт Пуассона $\nu=0,3$, коефіцієнт теплового розширення $\alpha_t=1,4 \cdot 10^{-5}$ К⁻¹. Для мідних контактних пластин використовувалися параметри $\rho=1,68 \cdot 10^{-8}$ Ом·м, $k=401$ Вт/(м·K), $E=1,1 \cdot 10^{11}$ Па, $\nu=0,34$, $\alpha_t=1,65 \cdot 10^{-5}$ К⁻¹. Для модифікованого епоксидного компаунду із спеціальним наповнювачем, що підвищує елек-

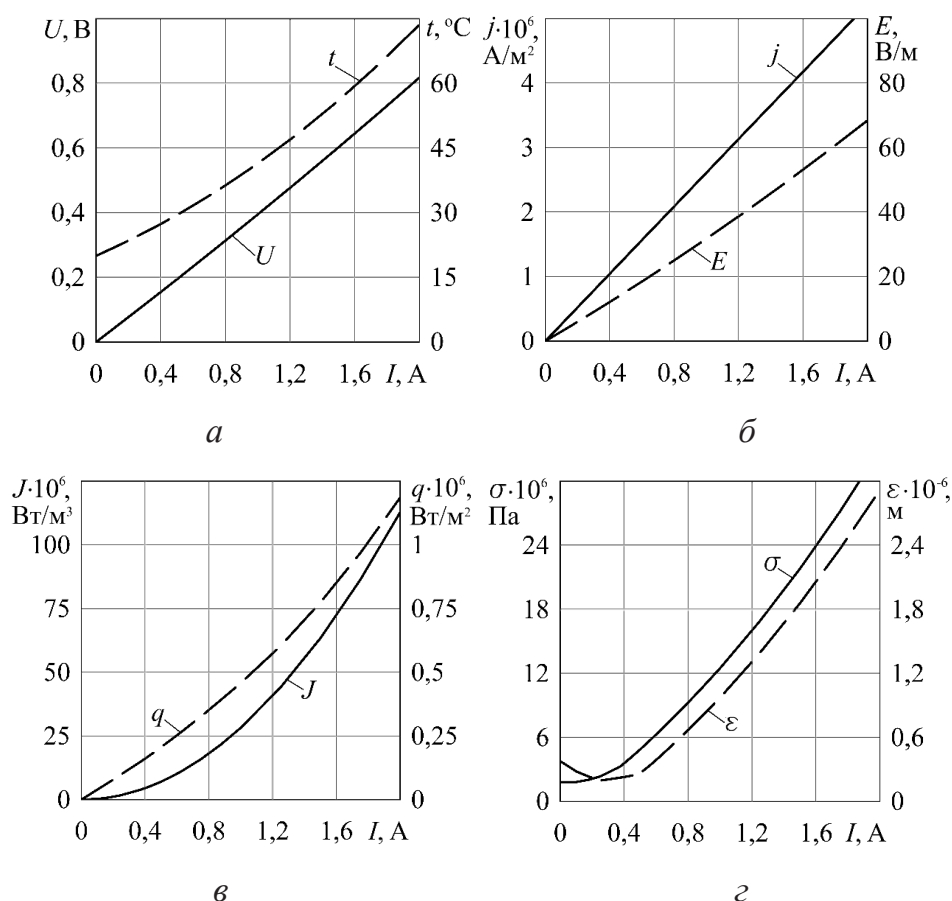


Рис. 3. Багатопараметричне представлення струмових залежностей електротермічних і механічних параметрів у структурі термоелектричного модуля з урахуванням міжфізичних взаємозв'язків: а – напруга U термоелектричного ланцюга з P - та N -елементів і температура t гарячої сторони модуля; б – струмова густина j та напруженість E електричного поля; в – джоулеве тепловиділення J і тепловий потік q ; з – механічні напруження σ і деформаційна відповідь ε напівпровідникового середовища

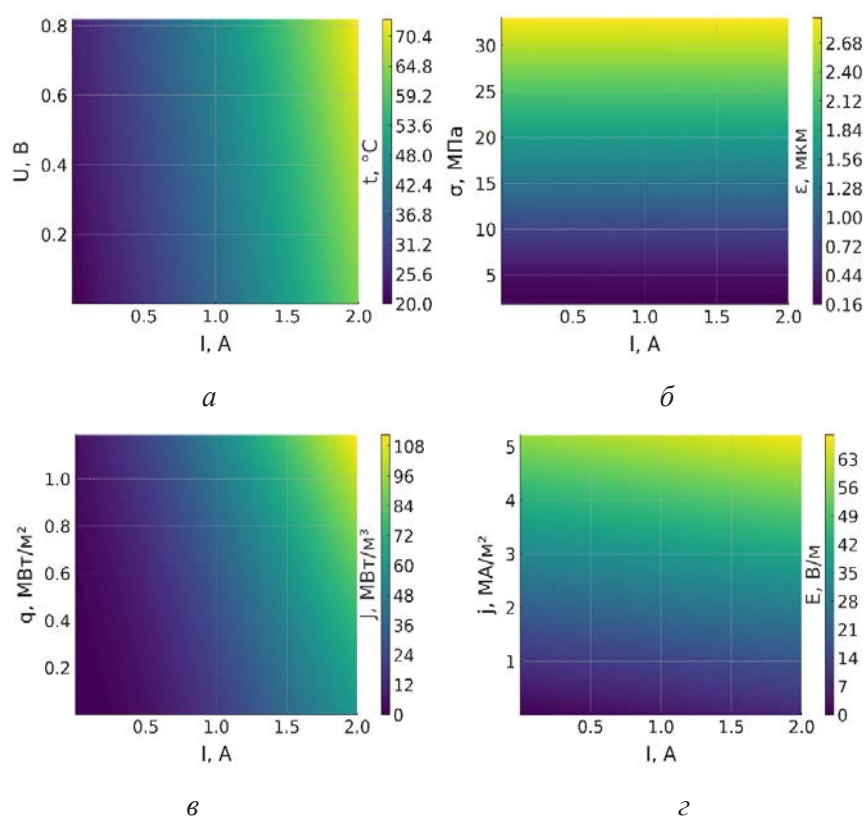


Рис. 4. Градієнтні поверхні співвідношення параметрів термоелектричного модуля при зміні величини струму: *a* – $t-I-U$; *б* – $\varepsilon-I-\sigma$; *в* – $J-I-q$; *г* – $E-I-j$

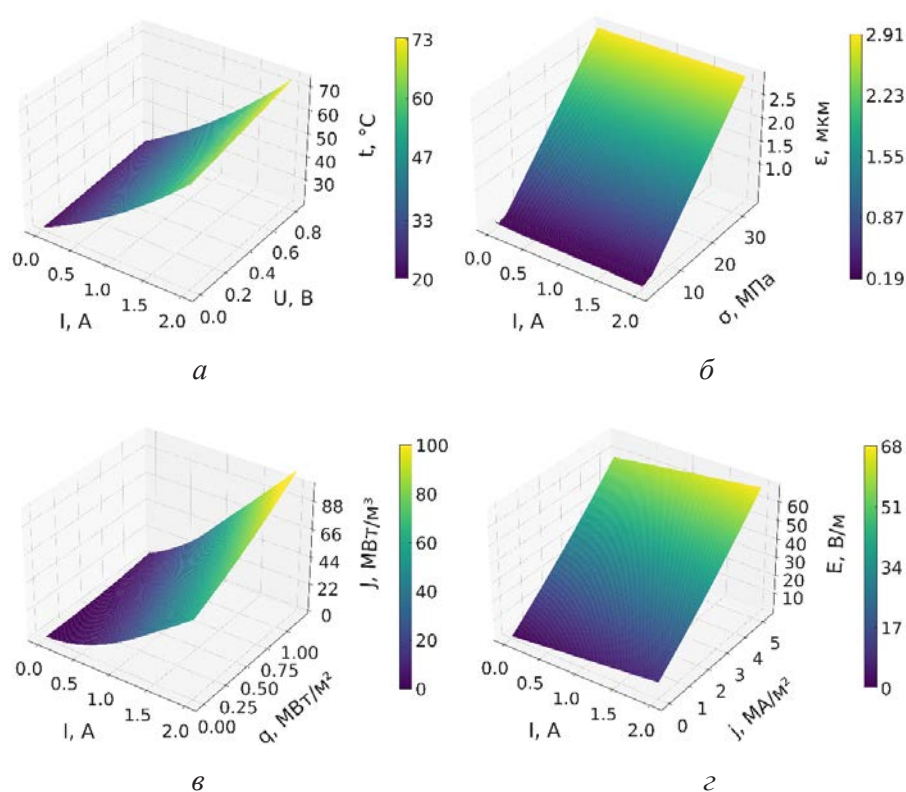


Рис. 5. Тривимірні поверхні відображення струмових залежностей параметрів термоелектричного модуля: *a* – $t-U-I$; *б* – $\varepsilon-\sigma-I$; *в* – $J-q-I$; *г* – $E-j-I$

троїзоляційні властивості, задавалися характеристики $\rho=1,0 \cdot 10^{15}$ Ом·м, $k=1,0$ Вт/(м·К), $E=10,0 \cdot 10^9$ Па, $\nu=0,3$, $\alpha_T=1,2 \cdot 10^{-5}$ К⁻¹. Для керамічних пластин з оксиду алюмінію (Al_2O_3) приймалися значення $\rho=1,0 \cdot 10^{13}$ Ом·м, $k=30$ Вт/(м·К), $E=3,5 \cdot 10^{11}$ Па, $\nu=0,22$, $\alpha_T=7,0 \cdot 10^{-6}$ К⁻¹. При типовому електричному підключенні (червоний «+», чорний «-») струм спочатку проходить через напівпровідниковий елемент *P*-типу, а далі через елемент *N*-типу, формуючи послідовний термоелектричний ланцюг у складі модуля.

Результати багатопараметричного аналізу впливу електричного струму *I* на електротермічні та механічні характеристики термоелектричного модуля (рис. 3) демонструють міжфізичні взаємозв'язки, що виникають при зміні струмового навантаження.

На рис. 3, а подано залежності напруги *U* та температури гарячої контактної поверхні *t*, які відображають термопотенціальні зміни. На рис. 3, б наведено залежності густини струму *j* та напруженості електричного поля *E*. Рис. 3, в ілюструє динаміку густини джоулевого тепловиділення *J* та теплового потоку *q*, що визначає теплову ефективність елементів. На завершення, на рис. 3, г представлено залежності еквівалентних механічних напружень σ і деформацій ϵ , які характеризують структурну стабільність модуля.

Аналіз плоских (рис. 4) і тривимірних (рис. 5) градієнтних поверхонь підтвердив узгодженість електричних, теплових і механічних параметрів модуля.

Представлені залежності («*t-U-I*», «*ε-σ-I*», «*J-q-I*», «*E-j-I*») демонструють комплекс взаємозв'язків у багатовимірному параметричному просторі: різке зростання температури при підвищених струмі та напрузі, локалізацію механічних напружень, а також нерівномірність розподілу струму й теплового потоку, що свідчить про перехід від стабільного до критичного режиму. Такий підхід дозволяє визначити оптимальні робочі діапазони для систем охолодження SLD у волоконно-оптичних гіроскопах суднової навігації.

Висновки. Для волоконно-оптичних гіроскопів суднової навігації досліджено мініатюрний термоелектричний модуль розмірами 8×8×3 мм. Модуль побудований на базі 21 *P-N*-термопар (11 елементів *P*- і 11 *N*-типу) з телуриду вісмуту (Bi_2Te_3), комутованих через 23 мідні контактні пластини у П-подібну структуру, забезпечує рівномірний розподіл тепла та ефективне його відведення. Чисельне моделювання показало, що при струмі 0,6-0,75 А досягається робочий режим, який забезпечує формування температурного перепаду між сторонами модуля на рівні 20-27 °С за збереження стабільності електричних параметрів і помірних механічних напружень. Отримані результати підтверджують ефективність використання розробленого термоелектричного модуля для охолодження суперлюмінесцентних діодів у волоконно-оптичних гіроскопах суднової навігації.

Список літератури:

1. Lefèvre H. C. The Fiber-Optic Gyroscope. 3rd ed. Norwood, MA: Artech House, 2014. 370 p.
2. Udd E., Digonnet M. J. F. (Eds.). Design and Development of Fiber Optic Gyroscopes. Bellingham, WA: SPIE Press, 2019. 682 p. DOI: <https://doi.org/10.1117/3.2522292>
3. Yang Y., Li S., Yang F., Jin W. Differential Fiber Optic Gyroscope Driven by Two Broadband Sources of Different Wavelengths. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 65443–65449. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2984006>
4. Rózański A., Gawlikowski M., Pysz D. Temperature stabilization in fibre optic gyroscopes for high-performance applications. *Optics and Laser Technology*. 2016. Vol. 86. P. 68–72. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2016.06.015>
5. Minnich A. J. Thermoelectric cooling of electro-optic components. In: Rowe D. M. (Ed.), Thermoelectrics Handbook: Macro to Nano. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2024. Chapter 28. URL: https://www.researchgate.net/publication/389160794_Thermoelectric_Cooling_of_Electro-Optic_Components (Accessed: 22 Sep. 2025).
6. Goldsmid H. Julian. Introduction to Thermoelectricity. 2nd ed. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2016. 278 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-662-49256-7>
7. Тимошук О. М., Шапран Ю. А. Аналіз методів та засобів нейтралізації вібрації суднового дизель-генератора. *Водний транспорт: збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій*. Київ : ДУІТ, 2025. Вип. 1(42). С. 61–72. DOI: <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.09>
8. Тараненко С. В., Кириченко О. С., Чередник В. М., Колесник В. В., Пріступа С. В., Мельник В. Ю. Ідентифікація моделі генератора вібрацій з одним ступенем вільності. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. Київ : ТНУ ім. В. І. Вернадського, 2025. Т. 36(75), № 3. Ч. 1. С. 392–399.
9. Дубинець В. Г., Хільчевський В. В., Савченко О. В. Основи методу скінченних елементів. Чернівці : ЧДТУ, 2007. 288 с.

10. Wright D. N., et al. Thermal management of MEMS element with thermoelectric-cooler. *2021 23rd European Microelectronics and Packaging Conference & Exhibition (EMPC)*, Gothenburg, Sweden, 2021. P. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.23919/EMPC53418.2021.9584996>
11. Wang Z., et al. Temperature Control for MEMS Gyroscope with Thermoelectric Cooler. *2024 IEEE 19th International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems (NEMS)*, Kyoto, Japan, 2024. P. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/NEMS60219.2024.10639902>
12. Wang Z., Zhou Y., Jiang B., Zhang J., Zhou T., Su Y. A Compact Temperature Controller for MEMS Vibratory Gyroscopes Using Thermoelectric Cooler. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 2024. Vol. 71, No. 6. P. 3888–3894. DOI: <https://doi.org/10.1109/TED.2024.3392184>
13. Анатичук Л. І., Вихор Л. М. Вплив електричних та теплових опорів контактів і комутацій на холодильний коефіцієнт термоелектричного модуля. *Термоелектрика*. Чернівці : Інститут термоелектрики НАН України та МОН України, 2021. № 3. С. 19–33.
14. Анатичук Л. І., Гаврилюк М. В., Лисько В. В. Обладнання для визначення параметрів термоелектричних модулів охолодження. *Термоелектрика*. Чернівці : Інститут термоелектрики НАН України та МОН України, 2021. № 4. С. 58–68.
15. Анатичук Л. І., Лисько В. В. Методика визначення термоелектричних параметрів матеріалів у складі термоелектричних модулів охолодження. *Термоелектрика*. Чернівці : Інститут термоелектрики НАН України та МОН України, 2021. № 3. С. 73–85.
16. Дмитриченко М. Ф., Гутаревич Ю. Ф., Тріфонов Д. М., Сирота О. В. Застосування термоелектричних перетворювачів енергії для зменшення впливу природно-кліматичних факторів на технічну готовність транспортного засобу. *Термоелектрика*. Чернівці : Інститут термоелектрики НАН України та МОН України, 2020. № 3. С. 58–69.
17. Кириченко О. С. Порівняльний аналіз характеристик термоелектричних модулів з різними геометричними формами напівпровідників для електрообладнання транспорту. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. Київ : ТНУ ім. В. І. Вернадського, 2023. Т. 34(73), № 1. С. 256–263. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.1/39>
18. Кириченко О. С., Білюк І. С., Шарейко Д. Ю., Фоменко А. М., Гаврилов С. О., Бугрім Л. І. Чисельне тривимірне моделювання термоелектричного охолоджувача вимірювального електроустаткування автоматичних систем. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. Київ : ТНУ ім. В. І. Вернадського, 2018. Т. 29(68), Ч. 1, № 6. С. 58–63.
19. Кириченко О. С. Вплив режиму та способу конвекції на робочі характеристики сконструйованого термоелектричного модуля суднового електрообладнання. *Водний транспорт: збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій*. Київ : ДУІТ, 2025. Вип. 2(43). С. 5–19. DOI: <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2025.2.43.01>
20. Кириченко О. С. Термоелектричні модулі з різними способами контактного з'єднання напівпровідникових термоелементів. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. Київ : СХУ ім. В. Даля, 2023. № 1(277). С. 31–37. DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2023-277-1-31-37>
21. Kyrychenko O., Golubieva S., Morneva M. Modeling of Thermoelectric Modules with Thermal Stress Damping for Transport Electrical Equipment. *2023 IEEE 5th International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*, Kremenchuk, Ukraine, 2023. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/MEES61502.2023.10402432>
22. Горський П. В. Демпфування термомеханічних напружень як засіб підвищення циклічної стійкості термоелектричних перетворювачів енергії. *Термоелектрика*. Чернівці : Інститут термоелектрики НАН України та МОН України, 2023. № 4. С. 17–26.
23. Тараненко С. В., Кириченко О. С., Пріступа С. В., Голубєва С. М. Демпфування термічних напружень в термоелектричних модулях суднового електрообладнання. *Водний транспорт: збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій*. Київ : ДУІТ, 2024. Вип. 1(39). С. 69–82. DOI: <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.07>
24. Тараненко С. В., Кириченко О. С., Пріступа С. В., Голубєва С. М., Пастух О. В. Термоелектричні модулі з компенсованими комутаційними пластинами для пристроїв суднової енергетики. *Водний транспорт: збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій*. Київ : ДУІТ, 2023. Вип. 1(37). С. 201–213. DOI: <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.23>
25. Лобунець Ю. М. Оцінка характеристик ОТЕС з термоелектричними перетворювачами енергії. *Термоелектрика*. Чернівці : Інститут термоелектрики НАН України та МОН України, 2013. № 1. С. 62–67.
26. Кириченко О. С. Аналіз пристрою Пельтьє з епоксидним компаундом для суднових автоматизованих систем охолодження та термостабілізації. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. Київ : СХУ ім. В. Даля, 2025. № 2(288). С. 37–48. DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-288-2-37-48>

27. Анатичук Л. І. Термоелектричні перетворювачі енергії. Термоелементи. Елементна база термоелектрики: монографія. Т. 2 / Л. І. Анатичук; ред. Л. М. Вихор, О. Я. Лусте. Чернівці : Інститут термоелектрики НАН України та МОН України, 2003. 376 с.

28. Анатичук Л. І., Балазюк В. М., Лусте О. Я., Малишко В. В. Про підвищення циклічної стійкості термоелектричних модулів охолодження. *Термоелектрика*. Чернівці : Інститут термоелектрики НАН України та МОН України, 2003. № 4. С. 71–75.

29. Wright D. N., et al. Optimising thermal management of MEMS element with thermoelectric-cooler. 2022 *IMAPS Nordic Conference on Microelectronics Packaging (NordPac)*, Gothenburg, Sweden, 2022. P. 1–6.

30. Nazir J., Vivek T., Jaisingh T. Temperature stabilization in fibre optic gyroscopes for high altitude aircraft. *Optik*. 2016. Vol. 127, Issue 20. P. 9701–9710. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2016.03.083>

31. Ciminelli C., Dell'Olio F., Armenise M. N. High-Q Spiral Resonator for Optical Gyroscope Applications: Numerical and Experimental Investigation. *IEEE Photonics Journal*. 2012. Vol. 4, No. 5. P. 1844–1854. DOI: <https://doi.org/10.1109/JPHOT.2012.2218098>

Kyrychenko O.S., Klochkov Y.P., Melnyk V.Y., Kolomiets D.P., Vechurko O.M., Shevchenko V.I.
MODELING OF OPERATING CHARACTERISTICS OF A THERMOELECTRIC MODULE FOR FIBER-OPTIC GYROSCOPES IN MARINE NAVIGATION

Modern ship navigation systems require reliable heading instruments; accordingly, gyrocompasses are increasingly equipped with fiber-optic gyroscopes (FOGs). This type of gyroscope belongs to high-precision opto-electronic instruments capable of determining a vessel's heading independently of GPS and other navigational aids. FOGs are often fitted with Peltier thermoelectric modules (TEMs) to cool superluminescent diodes (SLDs) that generate the interference signal in the optical fiber light source. Operation under real marine conditions necessitates additional insulation of thermoelectric components against high humidity, salt fog, and vibration. In this work, a miniature thermoelectric module based on a modified epoxy compound was developed. Using the designed drawings, a three-dimensional model of the module was created and analyzed by numerical calculation. The results for the FOG TEM at currents from 0 to 2 A were used to construct performance characteristics in the form of functional plots of key quantities as well as two- and three-dimensional response surfaces. The analysis enabled us to assess the effectiveness of the developed miniature TEM for use in FOGs of shipboard navigation systems.

The study focused on a TEM with overall dimensions of $8 \times 8 \times 3$ mm, which places it in the class of miniature thermoelectric modules. The thermoelectric circuit comprised 21 P-N thermocouples, totaling 11 P-type and 11 N-type semiconductor legs, each measuring $0.82 \times 0.82 \times 1.5$ mm. Bismuth telluride (Bi_2Te_3) was used for both semiconductor types, with Seebeck coefficients $\alpha_p = +1.8 \times 10^{-4}$ V/K and $\alpha_n = -1.8 \times 10^{-4}$ V/K; copper served as the material for the interconnect plates, and Al_2O_3 ceramic for the package. The module interior was filled with a modified epoxy compound characterized by Young's modulus $E = 10$ GPa, Poisson's ratio $\nu = 0.2$, thermal conductivity $k = 1.0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, and coefficient of thermal expansion $\alpha_T = 1.2 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$. The numerical modeling accounted for coupled electrical, thermal, and mechanical processes. It was established that, at an operating current of 0.6–0.75 A, the temperature difference between the module's hot and cold sides is 20–27 °C. The study also discusses avenues for further optimization of TEM materials and structural features aimed at developing new generations of miniature cooling modules for fiber-optic gyroscopes in ship navigation systems.

Key words: modeling, thermoelectric module, operating characteristics, fiber-optic gyroscopes, marine navigation.

Дата надходження статті: 24.09.2025

Дата прийняття статті: 14.10.2025

Опубліковано: 16.12.2025